フランジ付き点火プラグの基本特性と天然ガスエンジンへの応用*

氏 家 康 成^{*1}, 江 間 佑 二^{*2}
野 村 浩 司^{*1}, 鳥 居 将 行^{*3}Research on the Fundamental Property of Flanged Spark Plug
and Application to Natural Gas EngineYasushige UJIIE^{*4}, Yuji EMA,
Hiroshi NOMURA and Masayuki TORII^{*4}Department of Mechanical Engineering, College of Industrial Technology, Nihon University,
1-2-1 Izumicho, Narashino-shi, Chiba, 275-8575 Japan

Spark ignition characteristics of flanged spark plugs have been studied experimentally. Experiments were performed using a constant volume combustion chamber and a natural gas engine. Flanged spark plugs were made by remolding spark plugs on the market. The minimum ignition energy was employed to evaluate the ignition characteristics of the flanged spark plugs. It was found that the flanged spark plug reduces the minimum ignition energy. It was observed by schlieren photography that the shock wave was reflected by the flanges concentrated on a flame kernel. This fact suggests that the adiabatic compression due to the shock concentration reduces the minimum ignition energy. There is little effect of the flange on the flame speed, although it is well known that the existence of flanges prevents the initial growth of the flame kernel. It was found that, in actual engine test, the ignition probability is increased and the lean limit is extended.

Key Words: Ignition, Combustion, Spark Ignition, Flanged Spark Plug, Shock Wave, Natural Gas Engine

1. 緒 言

現在, 自動車用火点火機関では, 燃料消費率の低減や排気ガス浄化の目的から希薄燃焼が指向されている。希薄混合気を用いる上で, 燃焼室内の強い乱れは火炎伝播速度の促進に有効である反面, 火炎核の熱損失が増大して点火は困難になる。その対策として, 火花エネルギーを増大させて失火を回避しているが, 点火系の早期劣化や電磁波障害 (EMI) が懸念されることから, 点火エネルギーの低減は重要な課題の一つである。過去に定容燃焼容器を用いた基礎実験を行い, 火花電極に2枚のフランジを並行に設置し, 火花放電時に発生する衝撃波のエネルギーを反射・回収することが, 最小点火エネルギー低減に有効であるという報告がされている¹⁾²⁾。

そこで本研究では実機への応用を念頭に置き, 点火プラグの接地電極にフランジを設置し, 定容燃焼容器

内の静止混合気中で点火実験を行ったところ, 同様に最小点火エネルギーの低減効果が確認された。さらにガソリンエンジンに比べて点火条件の厳しいとされる天然ガスエンジンを用い, フランジ付き点火プラグが点火特性に与える影響を調べた。

2. 実験装置および方法

予備実験で用いた実験装置の概略を図1に示す。定容燃焼容器はステンレス鋼製の円筒形で, 燃焼室は直径 40 mm, 厚さ 30 mm である。燃焼容器の両端面には衝撃波および火炎核の成長形態観察用に石英ガラス窓が取り付けられており, シュリーレン光学系を設置した。混合気の点火には自作の CDI 方式点火装置を用い, 容量成分火花による点火実験を行った。混合気は 3.8 vol.% プロパン-空気予混合気を用いた。

実機における実験装置の概略を図2に示す。供試機関は, 日産工機製 H25 型ガソリンエンジンに天然ガスを燃料として用いた。供試機関の主な諸元は直列 4 気筒, 排気量 2472cc, ボア×ストローク 92.0mm×93.0mm, 圧縮比 8.7 である。燃料である天然ガスは Governor-zero によって大気圧に調圧され, 層流形流

* 原稿受付 2003 年 3 月 17 日。

^{*1} 正員, 日本大学生産工学部 (〒275-8575 習志野市泉町 1-2-1)。^{*2} 日本大学大学院生産工学研究科。^{*3} セントラルエンジニアリング(株) (〒100-0005 東京都千代田区丸の内 2-2-1 岸本ビル 511 号)。

E-mail: ujiie@cit.nihon-u.ac.jp

量計により燃料流量を計測したのち、混合器に吸入される。またメイン・アジャスト・スクリューにより燃料流量を調整し、混合気濃度を設定した。吸入空気流量測定も層流形流量計を用いた。燃焼室内の圧力履歴を測定するため、燃焼室の1つに圧力センサを取り付け、ストレージオシロスコープに圧力波形を記録した。

図3に定容燃焼容器用フランジ付き点火プラグと実機用フランジ付き点火プラグを示す。定容燃焼容器に用いたフランジ付き点火プラグは、市販のプラグ（NGK製B8EVX）の接地電極を取り外し、新たに接地電極およびフランジを設置した。天然ガスエンジンで使用したフランジ付き点火プラグは、市販のプラグ（NGK製B4ES）を加工し、フランジの脱落を防ぐためステンレス鋼製の線材3本でねじ止めした後、ろう付けを施した。フランジ直径を7.9mmで変化させ、フランジ間隔は定容燃焼容器用プラグでは2~10mmに、実機用プラグではフランジ直径9mmでは4~8mmに、フランジ直径7mmでは2.5~6mmに変化させ、点火確率を求めた。また、定容燃焼容器を用いた実験では、点火エネルギーの測定には火花電極間の電圧波形と電流波形からエネルギーを求める電氣的測定法を用いた。点火確率は点火回数30を点火に要した火花放電回数で除した値とし、点火確率50%時の点火エネルギーを最小点火エネルギーと定義した。実機では点火確率90%程度でエンジンの不調を聴感で察知したため、最小点火エネルギーの定義は行わなかった。実機での点火確率を求めるにあたっては、以下の手順によった。点火確率100%を保てる最低当量比の運転状態で、正味平均有効圧力0.3MPa、機関回転速度2000r.p.m.を設定した。ついで、順次当量比を低下させ、放電回数300回のうちの点火回数を測定し算出した。このとき初圧が大気圧時の圧縮終圧を目安とし、燃焼最大圧力が2.0MPaより低いものを失火とみなした。

3. 定容燃焼容器における 実験結果および考察

フランジ直径9mmにおいて、フランジ間隔を2~10mmに変化させたときの最小点火エネルギーと点火確率の関係を図4に示す。横軸は点火エネルギー、縦軸は点火確率を示し、フランジ間隔を副変数として用いた。いずれの場合においても、点火エネルギーの増加とともに点火確率は増大しており、フランジ付きプラグがフランジなしプラグの点火確率よりも高くなっていることがわかる。この理由として、フランジに

Fig. 1 Experimental apparatus for constant volume combustion chamber

Fig. 2 Experimental apparatus for natural gas engine

Fig. 3 Flanged spark plugs

より衝撃波が反射されたことによって、火炎核に干渉する位置で断熱圧縮が起こり、本来なら周囲に発散するはずの衝撃波のエネルギーを一部熱エネルギーとして回収しているためと考えられる。フランジ間隔が狭いほど、衝撃波の散逸領域の減少や反射距離低減の関係で回収できるエネルギーが大きくなると考えられる。本実験範囲では火炎核からフランジへの熱損失の影響

は小さいと思われるが、フランジ間隔 2 mm 未満では最小点火エネルギーが急増することを確認している。

図 5 にフランジ直径 9 mm, フランジ間隔 5 mm におけるフランジ付き点火プラグの衝撃波の成長形態を示す。火花放電時を $0 \mu\text{s}$ とし, Frame Rate は $1 \mu\text{s}$ とした。火花放電時に発生した衝撃波がフランジにより反射を繰り返し, 火炎核に干渉していることがわかる。衝撃波の進行に伴ってそのエネルギーは減衰するため, フランジ間隔が狭いほど減衰前の高エネルギー時に反射することができ, 有効にエネルギーが回収されるものと考えられる。またフランジ間隔が狭いことで, フランジ間隔からの衝撃波の散逸割合が減少するため, エネルギーの回収効果が高いと考えられる。このことは過去のフランジ付き電極による基礎実験において, フランジ間隔が小さくなるにつれ最小点火エネルギーが低減されたことにより確認されている²⁾。しかしながら, 図 4 ではフランジ間隔 3, 4 mm においてその傾向が逆転している。原因解明のため, 過去の基礎実験で行ったフランジ付き電極における衝撃波のシュリーレン写真と比較して考察する。

図 6 にフランジ間隔 5 mm におけるフランジ付き電極の衝撃波の成長過程を示す。火花放電後衝撃波が発生し, 2 つのフランジより反射された衝撃波は火花間隔に対し対照的となっている。そのため両フランジから反射された衝撃波は同時に火炎核に干渉しており, 図 5 と比較するとより効果的に衝撃波のエネルギーを回収していると推定される。したがって図 4 においてフランジ間隔と点火確率が一般的な関係にならない理由として, 図 6 のフランジ付き電極を用いた実験では 2 枚のフランジを火花間隔から等距離に配置していたのに対し, 本実験では接地電極側のみにフランジを配置したため, 中心電極側ではプラグのねじ部端面と中心電極絶縁体によって衝撃波が反射され, 複雑な反射を起こしてエネルギーの回収率が低下したからであると考えられる。

図 7 にフランジ間隔が最小点火エネルギーに及ぼす影響について示す。縦軸は最小点火エネルギー, 横軸はフランジ間隔である。フランジ直径を副変数とし, フランジがない場合の値を破線で示す。図より, すべての条件においてフランジがない場合よりも最小点火エネルギーは小さい値を示した。このことより, フランジによって衝撃波の持つエネルギーを回収することで, 最小点火エネルギーを大幅に低減していることが分かる。また各フランジ直径において, フランジ間隔 2 mm で最小点火エネルギーは最小値をとり, フランジ直径 9 mm ではフランジ間隔 3 mm で, フランジ直

Fig. 4 Relation between ignition energy and ignition probability ($\phi=0.94$)

Fig. 5 Schlieren photographs of shock wave

Fig. 6 Schlieren photographs of shock wave

径 7 mm ではフランジ間隔 4 mm で極大値を示し, フランジ間隔 8 mm 以上で再び増加した。フランジ間隔 2 mm で最小点火エネルギーが最小値を示す理由, および極大値を示す理由は前述のとおりである。フランジ間隔 8 mm 以上で再び増加するのは, フランジ間隔が大きいため, フランジがない状態に近づいたことによると考えられる。しかしながら, 過去のフランジ付き電極での実験とは異なり, フランジがない場合の値に漸近せずにある程度のエネルギー低減が見られる。これは, フランジ間隔が大きくなっても接地電極側フランジの位置が変化するだけで火花間隔中心と中心電

極側フランジ面との位置関係が変化しないので、中心電極側で反射する衝撃波の進行距離が変わらなく、ある程度のエネルギー回収が行われるものと考えられる。

前述のとおり、フランジには最小点火エネルギーを低減する効果がある反面、熱損失のために火炎の成長が抑制されていると考えられる。そこで燃焼時の圧力履歴から燃焼所要時間を求めた。燃焼所要時間は火花放電から最大燃焼圧力までの時間と定義した。図8にフランジ間隔が燃焼所要時間に及ぼす影響を示す。火花エネルギーはフランジなしの場合に合わせて $23.0 \pm 0.5 \text{ mJ}$ に調整した。縦軸に燃焼所要時間、横軸にフランジ間隔を示し、比較のためフランジなしプラグの値を破線で示す。図より、フランジ間隔が小さい範囲ではフランジなしプラグよりも燃焼所要時間は若干増大した。これはフランジへの熱損失が影響したためと考えられる。またフランジ間隔が大きい条件では、フランジなしプラグよりも燃焼所要時間が若干減少しており、フランジへの熱損失の影響が小さく、エネルギー回収による火炎核の保温作用により火炎伝播が促進されたためと考えられる。また、フランジ端部による乱れ発生が寄与していることも考えられる。いずれにしても本実験範囲では、火炎核からフランジへの熱損失の影響は小さいものと判断される。

Fig. 7 Relation between flange gap and minimum ignition energy ($\phi=0.94$)

4. 天然ガスエンジンにおける実験結果および考察

フランジ付きプラグを実機に適用した場合の、フランジなしプラグおよびフランジ間隔 4mm における燃

Fig. 8 Relation between flange gap and burning time ($\phi=0.94$)

a) non-flange

b) flanged plug (G=4, D=9)

Fig. 9 Indicated pressure history ($\phi=0.61$)

焼室内の圧力履歴を図9に示す。縦軸に燃焼室内圧力、横軸に時間を示し、点火したとみなす 2.0MPa を破線で示した(実測の圧縮終圧は 1.2MPa)。当量比はいずれ

も 0.61 である。フランジなしプラグではミスファイアを起こしており、点火した場合でも圧力変動が大きいことがわかる。これに対しフランジ付きプラグでは、すべて点火していることと圧力変動が小さいことがわかり、安定した燃焼が得られ、希薄領域におけるフランジ付き点火プラグの優位性が明らかである。

フランジ直径 9mm における当量比と点火確率の関係を図 10 に示す。横軸に当量比、縦軸に点火確率を示し、副変数としてフランジ間隔を用いた。すべてのプラグにおいて当量比の増加に従い点火確率が增大していることがわかる。フランジ間隔 2mm を除くフランジ付きプラグにおいては、フランジなしプラグに比べて高い点火確率を示していることから、実機の複雑で強い乱れ場中で誘導成分を含んだ合成火花においても、フランジによる衝撃波のエネルギー回収効果が得られることがわかった。フランジ間隔 2mm において、およそ当量比 $\phi = 0.63$ で通常プラグの値と交差し急激に点火確率が減少していることから、フランジ間隔 2mm が消炎距離になったと考えられる。過去のフランジ付き電極での実験において、フランジ間隔を 2mm よりも 0.1mm 程度小さくしただけで消炎距離に至り、点火確率が急激に減少したという報告がされている²⁾。

フランジ直径 7mm における当量比と点火確率の関係を図 11 に示す。縦軸に点火確率、横軸に当量比を示し、フランジ間隔を副変数とした。フランジ直径 9mm においてフランジ間隔 2mm が消炎距離となったため、フランジ直径 7mm ではフランジ間隔 2.5mm を作成して点火確率を求めた。同図より、いずれのプラグにおいても図 10 と同様に当量比の増加に伴って点火確率が增大していることがわかる。フランジ間隔 4 および 6mm ではフランジなしプラグの値を上回っており、フランジ直径 9mm と同様にフランジ間隔 4mm で点火確率は最も高くなった。フランジ間隔 2.5mm においては、フランジ直径 9mm でのフランジ間隔 2mm と同様に、当量比 0.64 から希薄側では急激に点火確率が減少しており、消炎距離となったと思われる。フランジ間隔 4 および 6mm ではフランジ直径 9mm における点火確率とほぼ同じ値を示していることから、定容燃焼容器における基礎実験と同様に、フランジ直径の影響は小さいと考えられる。

図 12 に当量比 0.57 における、フランジ間隔と点火確率の関係を示す。縦軸に点火確率、横軸にフランジ間隔を示し、同一当量比におけるフランジなしプラグの点火確率を破線で示した。図より、すべてのフランジ間隔でフランジなしプラグの点火確率より

Fig.10 Relation between equivalence ratio and ignition probability(D=9mm)

Fig.11 Relation between equivalence ratio and ignition probability(D=7mm)

も高くなっていることが分かる。また、フランジ間隔 4~7mm の範囲では点火確率が高い値を示しており、3mm になると点火確率が減少している。これは、フランジ間隔が狭くなると火炎核からフランジへの熱損

失が大きくなったためと考えられる。前項で述べたとおり、フランジ間隔 2 および 2.5mm では急激に点火確率が減少し、当量比を 0.57 まで希薄にするとエンジンが停止して計測できなかったことからこのことが推測される。フランジ間隔 8mm において点火確率が減少しているのは、フランジが火花間隙より遠くなったことで衝撃波の散逸領域が増し、また、衝撃波進行距離が増大して十分にエネルギーの回収がなされなかったためと考えられる。

図 13 に各フランジ間隔におけるフランジ付きプラグの点火エネルギーを示す。比較のため、フランジなしプラグの点火エネルギーを破線で示した。図より、若干のばらつきはあるが、大きな差は認められなく、同一火花エネルギーの下でフランジ付きプラグの特性評価を実施したことが保証されている。

5. 結 言

予混合気の火花点火エネルギーを低減することを目的として、定容燃焼容器および天然ガスエンジンを用いてフランジ付き点火プラグの点火特性を調べた結果、以下の知見を得た。

1. 点火プラグにフランジを設置することにより、衝撃波の持つエネルギーを効果的に回収することで最小点火エネルギーを低減できる。
2. 定容容器を用いた静止混合気場では中心電極側で衝撃波が複雑な反射をし、その影響で若干の差はあるがフランジ間隔 3 mm～4 mm で最小点火エネルギーは一旦極大値を示す。
3. フランジには、衝撃波のもつエネルギーの回収および熱損失増大の相反する効果があるが、点火後の火炎伝播速度にはあまり影響しない。
4. 実機の強乱れ場中で合成火花を用いても、フランジの衝撃波エネルギー回収効果は得られる。
5. 本供試機関においては、いずれのフランジ直径においてもフランジ間隔 4mm で最も高い点火確率を示した。
6. フランジ間隔と点火確率は一様な関係となっておらず、フランジ間隔 3mm 以下および 7mm 以上で点火確率は減少する。5.の結論とも関連して、実機にフランジ付き点火プラグを適用する場合は、フランジ間隔を 4mm とするのが適当であると判断される。

最後に、本研究の一部は平成 14～15 年度文科省科学研究費補助金〔基盤研究 (c) 〕によるもので、供

Fig.12 Relation between flange gap and ignition probability ($\phi=0.57$)

Fig.13 Spark energy for actual engine

試機関は日産工機(株)のご提供であることを付記し、ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) 三森, 平沼, 青木, 野村, 氏家, 河野: 強乱れ場におけるフランジ付き電極の点火特性, 機講論Ⅲ, 96-1 (1996), 559-560
- 2) 三森, 佐藤, 野村, 氏家, 河野: フランジ付き電極の火花点火エネルギー低減に関する研究, 機講論Ⅲ, 97-1 (1997), 43-44